



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 198 54 789 A 1**

⑤① Int. Cl.⁶:
H 02 N 2/06

②① Aktenzeichen: 198 54 789.7
②② Anmeldetag: 27. 11. 98
④③ Offenlegungstag: 12. 8. 99

DE 198 54 789 A 1

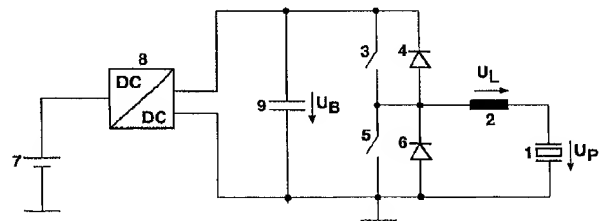
⑥⑥ Innere Priorität:
198 05 240. 5 10. 02. 98
⑦① Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑦② Erfinder:
Reineke, Joerg, 70469 Stuttgart, DE; Hock,
Alexander, 70435 Stuttgart, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements

⑤⑦ Es werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements beschrieben. Das Verfahren und die Vorrichtung zeichnen sich dadurch aus, daß der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom unter Berücksichtigung der Kapazität des piezoelektrischen Elements eingestellt wird. Dadurch kann erreicht werden, daß das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen unter allen Umständen wunschgemäß schnell und weit durchgeführt werden kann.



DE 198 54 789 A 1

5 Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 10, d. h. ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements.

Bei den vorliegend näher betrachteten piezoelektrischen Elementen handelt es sich insbesondere, aber nicht ausschließlich um als Aktoren bzw. Stellglieder verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente lassen
10 sich für derartige Zwecke einsetzen, weil sie bekanntermaßen die Eigenschaft aufweisen, sich in Abhängigkeit von einer daran angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

Die praktische Realisierung von Stellgliedern durch piezoelektrische Elemente erweist sich insbesondere dann von Vorteil, wenn das betreffende Stellglied schnelle und/oder häufige Bewegungen auszuführen hat.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Stellglied erweist sich unter anderem bei Kraftstoff-Einspritzdüsen
15 für Brennkraftmaschinen als vorteilhaft. Zur Einsetzbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoff-Einspritzdüsen wird beispielsweise auf die EP 0 371 469 B1 und die EP 0 379 182 B1 verwiesen.

Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Verbraucher, welche sich, wie vorstehend bereits angedeutet wurde, entsprechend dem jeweiligen Ladungszustand bzw. der sich daran einstellenden oder angelegten Spannung zusammenziehen und ausdehnen.

20 Das Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements kann unter anderem über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement wie beispielsweise eine Spule erfolgen, wobei diese Spule in erster Linie dazu dient, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen. Eine solche Anordnung ist in Fig. 7 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element ist in der Fig. 7 mit dem Bezugszeichen 101 bezeichnet.
25 Es ist Bestandteil eines über einen Ladeschalter 102 schließbaren Ladestromkreises und eines über einen Entladeschalter 106 schließbaren Entladestromkreises, wobei der Ladestromkreis aus einer Serienschaltung des Ladeschalters 102, einer Diode 103, einer Ladespule 104, des piezoelektrischen Elements 101, und einer Spannungsquelle 105 besteht, und wobei der Entladestromkreis aus einer Serienschaltung des Entladeschalters 106, einer Diode 107, einer Entladespule 108 und des piezoelektrischen Elements 101 besteht.

30 Die Diode 103 des Ladestromkreises verhindert, daß im Ladestromkreis ein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann. Die Diode 103 und der Ladeschalter 102 sind gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Die Diode 107 des Entladestromkreises verhindert, daß im Entladestromkreis ein das piezoelektrische Element ladender Strom fließen kann. Die Diode 107 und der Ladeschalter 106 sind wie die Diode 103 und der Ladeschalter 102 gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

35 Wird der normalerweise geöffnete Ladeschalter 102 geschlossen, so fließt im Ladestromkreis ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 geladen wird; die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 werden nach dem Laden desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Wird der normalerweise ebenfalls geöffnete Entladeschalter 106 geschlossen, so fließt im Entladestromkreis ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 entladen wird; der Ladezustand des piezoelektrischen Elements 101 bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 werden nach dem Entladen desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Durch die in der Fig. 7 gezeigte Anordnung läßt sich das piezoelektrische Element 101 mit relativ geringem Aufwand laden und entladen.

45 Allerdings ist es bei dieser und anderen Anordnungen zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen bislang noch nicht gelungen, das Laden und Entladen so ablaufen zu lassen, daß der Ladezustand des piezoelektrischen Elements nach dem Laden und Entladen desselben und/oder die Zeit, während welcher das piezoelektrische Element geladen oder entladen werden muß, um einen bestimmten Ladungszustand zu erreichen, immer und überall genau die gewünschten Werte annehmen.

50 Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. die Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 10 derart weiterzubilden, daß das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen stets wunschgemäß schnell und weit durchgeführt werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 (Verfahren) und durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 10 (Vorrichtung) beanspruchten Merkmale gelöst.

55 Demnach ist vorgesehen,

– daß der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom unter Berücksichtigung der Kapazität des piezoelektrischen Elements eingestellt wird (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 1) bzw.

60 – daß eine Steuer- oder Regelungsvorrichtung vorgesehen ist, welche dazu ausgelegt ist, den das piezoelektrische Element ladenden Ladestrom bzw. den das piezoelektrische Element entladenden Entladestrom unter Berücksichtigung der Kapazität des piezoelektrischen Elements einzustellen (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 10).

Dadurch können Einflüsse von Toleranzen, Veränderungen und Schwankungen der Kapazität des piezoelektrischen Elements auf den Umfang und die Geschwindigkeit des Ladens und Entladens desselben eliminiert werden. Dies ist sehr
65 bedeutsam, weil die Kapazität des piezoelektrischen Elements und damit auch die sich beim Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements einstellende Spannung bzw. die Zeit, während welcher das piezoelektrische Element geladen bzw. entladen werden muß, um eine vorbestimmte Spannung zu erreichen, und schließlich auch die durch das Laden

bzw. Entladen bewirkte Längenänderung des piezoelektrischen Elements stark von verschiedenerlei Faktoren wie beispielsweise der Temperatur, der vom piezoelektrischen Element aufzubringenden Kraft, dem Alter des piezoelektrischen Elements etc. abhängen. Durch die Eliminierung dieser Abhängigkeiten kann erreicht werden, daß der Ladezustand des piezoelektrischen Elements nach dem Laden und Entladen desselben und/oder die Zeit, während welcher das piezoelektrische Element geladen oder entladen werden muß, um einen bestimmten Ladungszustand zu erreichen, immer und überall genau die gewünschten Werte annehmen.

Dies erweist sich in zweifacher Hinsicht als vorteilhaft: einerseits, weil das piezoelektrische Element das dieses enthaltende System immer exakt gleich anregt, und andererseits weil dadurch verhindert wird, daß das das piezoelektrische Element enthaltende System aufgrund von Abweichungen vom wünschgemäßen Bewegungsablauf des piezoelektrischen Elements (zu schnelles oder zu langsames und/oder zu weites oder zu geringes Ausdehnen oder Zusammenziehen desselben) in Schwingungen versetzt wird.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind den Unteransprüchen, der folgenden Beschreibung und den Figuren entnehmbar.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 zwei Anordnungen zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements mit einstellbarem Lade- bzw. Entladestrom,

Fig. 2 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Ladephase (Ladeschalter **3** geschlossen) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

Fig. 3 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Ladephase (Ladeschalter **3** wieder geöffnet) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

Fig. 4 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Entladephase (Entladeschalter **5** geschlossen) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

Fig. 5 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Entladephase (Entladeschalter **5** wieder geöffnet) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

Fig. 6 den zeitlichen Verlauf von sich beim Betrieb der Anordnung gemäß **Fig. 1** einstellenden Spannungs- und Stromverläufen,

Fig. 7 eine herkömmliche Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements, und

Fig. 8 den zeitlichen Verlauf von sich beim Betrieb der Anordnung gemäß **Fig. 1** einstellenden Spannungs- und Stromverläufen.

Die piezoelektrischen Elemente, deren Laden und Entladen im folgenden näher beschrieben wird, sind beispielsweise als Stellglieder in Kraftstoff-Einspritzdüsen (insbesondere in sogenannten Common Rail Injektoren) von Brennkraftmaschinen einsetzbar. Auf einen derartigen Einsatz der piezoelektrischen Elemente besteht jedoch keinerlei Einschränkung; die piezoelektrischen Elemente können grundsätzlich in beliebigen Vorrichtungen für beliebige Zwecke eingesetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, daß sich die piezoelektrischen Elemente im Ansprechen auf das Laden ausdehnen und im Ansprechen auf das Entladen zusammenziehen. Die Erfindung ist selbstverständlich jedoch auch dann anwendbar, wenn dies gerade umgekehrt ist.

Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung zeichnen sich unter anderem dadurch aus, daß der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom und der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom unter Berücksichtigung der Kapazität des piezoelektrischen Elements eingestellt werden.

Eine Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements mit einstellbarem Lade- und Entladestrom ist in **Fig. 1** gezeigt und wird nachfolgend unter Bezugnahme darauf beschrieben.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Beispiel zu laden gilt, ist in der **Fig. 1** mit dem Bezugszeichen **1** bezeichnet.

Wie aus der **Fig. 1a** ersichtlich ist, liegt der eine der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements **1** dauerhaft auf Masse (ist mit einem ersten Pol einer Spannungsquelle verbunden), wohingegen der andere der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements über eine (zugleich als Ladespule und Entladespule wirkende) Spule **2** und eine Parallelschaltung aus einem Ladeschalter **3** und einer Diode **4** mit dem zweiten Pol der Spannungsquelle und über die Spule **2** und eine Parallelschaltung aus einem Entladeschalter **5** und einer Diode **6** mit dem ersten Pol der Spannungsquelle verbunden ist.

Die Spannungsquelle besteht aus einer Batterie **7** (beispielsweise einer KFZ-Batterie), einem dieser nachgeschalteten Gleichspannungswandler **8**, und einem diesem nachgeschalteten, als Pufferkondensator dienenden Kondensator **9**. Durch diese Anordnung wird die Batteriespannung (beispielsweise 12 V) in eine im wesentlichen beliebige andere Gleichspannung umgesetzt und als Versorgungsspannung bereitgestellt.

Eine besonders vorteilhafte Ausführungsform ist in **Fig. 1b** dargestellt. Bereits in **Fig. 1a** beschriebene Elemente sind mit entsprechenden Bezugszeichen gekennzeichnet. Bei dieser Ausführungsform ist zwischen den Schaltern **3** und **5** und dem piezoelektrischen Element ein Filtermittel **10** und eine Diode **20** angeordnet. Die Anode der Diode **20** ist mit dem einen Anschluß des piezoelektrischen Elements **1** verbunden. Die Kathode der Diode **20** ist mit der Spule **2** verbunden. Das Filtermittel **20** ist zum einen mit den beiden Anschlüssen der Diode **20** und zum anderen mit den beiden Anschlüssen der Diode **6** verbunden.

Das am Ausgang der Endstufe geschaltete Filtermittel bewirkt eine Glättung der Stromverläufe und der Spannungsverläufe. Hierdurch ergibt sich ein Verlauf des Stroms und der Spannung entsprechend einer Schwingkreissteuerung. Dadurch können die elektromagnetischen Störungen minimiert werden. Die beim Abschalten des Ladeschalters **3** und/oder des Entladeschalters **5** auftretenden Spitzen im Stromverlauf werden dadurch geglättet.

Die Diode **20** besitzt eine Schutzfunktion. Die Diode **20** verhindert negative Spannungen, die das piezoelektrische Element beschädigen können.

In der dargestellten Ausführungsform umfaßt das Filtermittel **20** eine Induktivität, die in Reihe mit der Spule **2** geschaltet ist. Ferner ist eine Kapazität **11** parallel zu den Dioden **20** bzw. **6** geschaltet.

Bei einer vereinfachten Ausführungsform kann die Induktivität 12 auch weggelassen werden. Dies gilt auch für die Diode 20.

Bauelemente können auch dadurch eingespart werden, daß die Spule 2 und die Induktivität 12 eine bauliche Einheit bilden, das heißt, daß lediglich eine Spule mit einem Mittelabgriff vorgesehen ist.

Das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgen im betrachteten Beispiel getaktet, D.h., der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 werden während des Lade- bzw. Entladevorganges wiederholt geschlossen und geöffnet.

Die sich dabei einstellenden Verhältnisse werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig. 2 bis 5 erläutert, von denen die Fig. 2 und 3 das Laden des piezoelektrischen Elements 1, und die Fig. 4 und 5 das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 veranschaulichen.

Der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 sind, wenn und solange kein Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgt, geöffnet. In diesem Zustand befindet sich die in der Fig. 1 gezeigte Schaltung im stationären Zustand. D.h., das piezoelektrische Element 1 behält seinen Ladungszustand im wesentlichen unverändert bei, und es fließen keine Ströme.

Mit dem Beginn des Ladens des piezoelektrischen Elements 1 wird der Ladeschalter 3 wiederholt geschlossen und geöffnet; der Entladeschalter 5 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Ladeschalters 3 stellen sich die in der Fig. 2 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Fig. 2 durch Pfeile angedeuteter Strom $i_{LE}(t)$ fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 Energie gespeichert wird. Der Energiefluß in die Spule 2 wird dabei durch die positive Potentialdifferenz zwischen dem Kondensator 9 und dem piezoelektrischen Element 1 bewirkt.

Beim kurz (beispielsweise einige μs) nach dem Schließen des Ladeschalters 3 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der Fig. 3 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, der Diode 6 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Fig. 3 durch Pfeile angedeuteter Strom $i_{LA}(t)$ fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in das piezoelektrische Element 1 fließt.

Entsprechend der Energiezufuhr zum piezoelektrischen Element erhöhen sich die an diesem einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum piezoelektrischen Element 1 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach Fig. 1 erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder auch erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Ladevorgangs) wird der Ladeschalter 3 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie zu (die im piezoelektrischen Element bereits gespeicherte Energie und die neu zugeführte Energie summieren sich), und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen zu.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 eine Vielzahl von Malen, so steigen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise an (siehe hierzu die Kurve A der später noch genauer erläuterten Fig. 6).

Wurde der Ladeschalter 3 während einer vorbestimmten Zeit und/oder eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element 1 den gewünschten Ladezustand erreicht, so wird das Laden des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Ladeschalters 3 beendet.

Soll das piezoelektrische Element 1 wieder entladen werden, so wird dies durch ein wiederholtes Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 bewerkstelligt; der Ladeschalter 3 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Entladeschalters 5 stellen sich die in der Fig. 4 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom $i_{EE}(t)$ fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie (ein Teil derselben) in die Spule 2 transportiert wird. Entsprechend dem Energietransfer vom piezoelektrischen Element 1 zur Spule 2 nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ab.

Beim kurz (beispielsweise einige μs) nach dem Schließen des Entladeschalters 5 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der Fig. 5 gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9, der Diode 4 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom $i_{EA}(t)$ fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in den Kondensator 9 zurückgespeist wird. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum Kondensator 9 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach Fig. 1 erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Entladevorgangs) wird der Entladeschalter 5 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie weiter ab, und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ebenfalls ab.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 eine Vielzahl von Malen, so nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise ab (siehe hierzu die Kurve A in der Fig. 6).

Wurde der Entladeschalter 5 während einer vorbestimmten Zeit und/oder eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element den gewünschten Entladezustand erreicht, so wird das Entladen des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Entladeschalters 5 beendet.

Das Ausmaß und der Verlauf des Ladens und des Entladens sind durch die Häufigkeit und die Dauer des Öffnens und Schließens des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 bestimmbar. Dies gilt nicht nur für die in der Fig. 1 gezeigte

Anordnung, sondern für alle Anordnungen, durch welche ein vergleichbares Laden und/oder Entladen von piezoelektrischen Elementen durchführbar ist; die besagten Anordnungen müssen dabei im wesentlichen "nur" für ein getaktetes Laden und Entladen eines oder auch mehrerer piezoelektrischer Elemente geeignet sein.

An dieser Stelle sei angemerkt, daß Anordnungen nach Art der Fig. 7 nicht für ein getaktetes Laden und/oder Entladen von piezoelektrischen Elementen ausgelegt sind. Dort wirken die Lade- und Entladespulen nämlich als das induktive Element eines im Zusammenwirken mit dem piezoelektrischen Element gebildeten LC-Reihenschwingkreises, wobei die Induktivität des induktiven Elements und die Kapazität des piezoelektrischen Elements allein den Verlauf und den Umfang des Ladens und des Entladens bestimmen (geladen und entladen werden kann jeweils nur mit der ersten Stromhalbwelle der ersten Schwingkreisschwingung, denn ein Weiterschwingen des Schwingkreises wird durch die im Ladestromkreis und Entladestromkreis enthaltenen Dioden unterbunden).

Im Gegensatz hierzu wird bei zum getakteten Laden und Entladen ausgelegten Anordnungen (beispielsweise bei Anordnungen nach Art der Fig. 1) die Spule (oder ein anderes induktive Eigenschaften aufweisendes Element) als ein Energie-Zwischenspeicher verwendet, der abwechselnd von der Stromversorgungsquelle (beim Laden) bzw. vom piezoelektrischen Element (beim Entladen) zugeführte elektrische Energie (in Form von magnetischer Energie) speichert und – nach einer entsprechenden Schalterbetätigung – die gespeicherte Energie in Form von elektrischer Energie an das piezoelektrische Element (beim Laden) bzw. einen anderen Energiespeicher oder einen elektrischen Verbraucher (beim Entladen) abgibt, wobei die Zeitpunkte und die Dauer (und damit auch der Umfang) der Energiespeicherung und der Energieabgabe durch die Schalterbetätigung(en) bestimmt werden.

Dadurch kann das piezoelektrische Element in beliebig vielen, beliebig großen und in beliebigen zeitlichen Abständen aufeinanderfolgenden Stufen wunschgemäß weit geladen und entladen werden.

Nutzt man die gegebenen Möglichkeiten dahingehend aus, daß man die Schalter derart wiederholt öffnet und schließt, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird, so können das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen schonend für diese und einfach an die individuellen und wechselnden Verhältnisse anpaßbar durchgeführt werden.

Die Betätigung des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 erfolgt durch eine in der Fig. 1 nicht gezeigte Steuer- oder Regeleinrichtung. Diese Steuer- oder Regeleinrichtung führt ein derartiges Öffnen und Schließen des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 durch, daß das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element dadurch unter Einhaltung eines vorgegebenen mittleren (Lade- bzw. Entlade-)Stromflusses auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird.

Hierzu werden der Ladeschalter 3 bzw. der Entladeschalter 5 zu bestimmten Zeitpunkten geöffnet und geschlossen, wobei sich die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geschlossen sind, und die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geöffnet sind, gleich oder unterschiedlich lang sein können und selbst innerhalb eines jeweiligen Lade- bzw. Entladevorganges beliebig verändert werden können.

Der Lade- bzw. Entladestrom, der sich dabei einstellen soll, wird im betrachteten Beispiel unter Berücksichtigung der Kapazität des zu ladenden bzw. zu entladenden piezoelektrischen Elements festgelegt, wobei jedoch der Ladestrom und der Entladestrom während eines jeweiligen Lade- bzw. Entladevorganges im wesentlichen konstant gehalten werden; gegebenenfalls erforderliche Veränderungen des Lade- und/oder Entladestromes können bei Bedarf aber auch während eines Lade- bzw. Entladevorganges durchgeführt werden.

Die Kapazität des piezoelektrischen Elements, in Abhängigkeit von welcher der Ladestrom bzw. der Entladestrom verändert werden, wird im betrachteten Beispiel nicht direkt gemessen, sondern über das Ausmaß bestimmt, um das sich das piezoelektrische Element beim Laden bzw. Entladen desselben ausdehnt bzw. zusammenzieht. Dabei macht man von der Erkenntnis Gebrauch, daß die durch das Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Elements verursachte Längenänderung desselben proportional zu der sich durch das Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements dort einstellenden Spannung ist, und daß die Spannung, die sich am piezoelektrischen Element einstellt, wenn dieses eine bestimmte Zeit mit einem bestimmten Strom geladen oder entladen wird, im wesentlichen ausschließlich von der Kapazität des piezoelektrischen Elements abhängt.

Der Zusammenhang zwischen der Längenänderung des piezoelektrischen Elements, der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung, und der Kapazität des piezoelektrischen Elements läßt sich mathematisch durch

$$\Delta l = d_{33} \cdot u = d_{33} \cdot \frac{1}{C_p} \cdot i_n \cdot t_n$$

ausdrücken, wobei

Δl die Längenänderung am piezoelektrischen Element

d_{33} die piezoelektrische Ladungskonstante

u die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung

C_p die Kapazität des piezoelektrischen Elements

i_n der (Ent-)Ladestrom beim aktuellen (Ent-) Ladevorgang, und

t_n die (Ent-)Ladezeit beim aktuellen (Ent-) Ladevorgang repräsentieren.

Entspricht die Längenänderung, die das piezoelektrische Element beim Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements mit einem vorbestimmten Lade- oder Entladestrom nach einer bestimmten Zeit erreicht, nicht einem Soll-Wert, so wird aus der Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert ein Korrekturfaktor berechnet, mit dem der verwendete Lade- oder Entladestrom multipliziert werden muß, um den Strom zu ermitteln, mit dem das piezoelektrische Element die vorbestimmte Zeit geladen oder entladen werden muß, um die Soll-Längenänderung zu erfahren; der zu verwendende Lade- oder Entladestrom kann selbstverständlich auch durch Nachschlagen in einer entsprechenden Tabelle oder auf sonstige Art und Weise ermittelt werden. Um zu große Sprünge im Lade- bzw. Entladestrom zu vermeiden, können Dämpfungsfaktoren und/oder Schwellenwerte für den Korrekturfaktor und/oder den Lade- oder Entladestrom vorgesehen werden.

Noch einfacher ist es, wenn die Anpassung des Lade- bzw. Entladestromes an die Kapazität des piezoelektrischen Elements nicht basierend auf der Längenänderung des piezoelektrischen Elements, sondern basierend auf der Zeit erfolgt, während welcher das piezoelektrische Element geladen bzw. entladen werden muß, bis sich an diesem eine vorbestimmte Spannung einstellt. Der besagte Korrekturfaktor, mit dem der beim (n-1)ten Lade- bzw. Entladevorgang verwendete Strom i_{n-1} multipliziert werden muß, um zu ermitteln, mit welchem Strom i_n das piezoelektrische Element beim nächsten (n-ten) Lade- oder Entladevorgang die vorbestimmte Zeit geladen oder entladen werden muß, um auf die vorbestimmte Spannung gebracht zu werden, ergibt sich dann zu

$$\frac{t_n - 1}{t_{soll}}$$

wobei

t_{n-1} die Zeit ist, während welcher das piezoelektrische Element mit dem Strom i_{n-1} geladen oder entladen werden mußte, um auf die vorbestimmte Spannung gebracht zu werden, und
 t_{soll} die Zeit ist, nach welcher das piezoelektrische Element beim Laden oder Entladen auf die vorbestimmte Spannung gebracht sein sollte.

D.h., der beim n-ten Lade- oder Entladevorgang zu verwendende Lade- bzw. Entladestrom i_n errechnet sich zu

$$i_n = i_{n-1} \cdot \frac{t_n - 1}{t_{soll}}$$

Auch hier können natürlich Dämpfungsfaktoren oder Schwellenwerte für den Korrekturfaktor und/oder den Lade- oder Entladestrom vorgesehen werden.

Die Anpassung des Lade- bzw. Entladestromes an die Kapazität des zu ladenden oder zu entladenden piezoelektrischen Elements basierend auf der Zeit, die zum Erreichen einer vorbestimmten Spannung benötigt wird, ist einfacher als eine Anpassung basierend auf der Längenänderung des piezoelektrischen Elements, weil die Messung von Spannung und Zeit einfacher ist als die Messung der Längenänderung des piezoelektrischen Elements.

Unabhängig davon, worauf die Anpassung basiert, kann erreicht werden, daß das piezoelektrische Element durch das Laden und Entladen während einer vorbestimmten Zeit eine vorbestimmte Längenänderung erfährt. Dies ist sehr vorteilhaft, weil

- 1) das piezoelektrische Element das dieses enthaltende System immer exakt gleich anregt, und
- 2) dadurch verhindert wird, daß das das piezoelektrische Element enthaltende System aufgrund von Abweichungen vom wünschenswerten Bewegungsablauf des piezoelektrischen Elements (zu schnelles oder zu langsames und/oder zu weites oder zu geringes Ausdehnen oder Zusammenziehen desselben) in Schwingungen versetzt wird.

Daß der so festgelegte Lade- bzw. Entladestrom tatsächlich auch fließt, kann durch eine Steuereinrichtung oder eine Regelvorrichtung erreicht werden, wobei der Stromfluß jedoch sowohl bei der Steuerung als auch bei der Regelung durch ein entsprechend häufiges und langes Öffnen und Schließen des Ladeschalters bzw. des Entladeschalters eingestellt wird.

Im Ergebnis gelangt man sowohl bei der Steuerung als auch bei der Regelung zu einem Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements wie es in Fig. 6 beispielhaft veranschaulicht ist.

In der Fig. 6 repräsentiert

- die mit A bezeichnete Kurve den Verlauf der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung,
- die mit B bezeichnete Kurve den Ladestrom bzw. den Entladestrom, durch den das piezoelektrische Element geladen bzw. entladen wird,
- die mit C bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Ladeschalters, und
- die mit D bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Entladeschalters.

Aus dem wie gezeigt erfolgenden wiederholten Schließen und Öffnen des Ladeschalters (Kurve C) resultiert ein zwar schwankender, aber im Mittel gleichbleibend großer Ladestrom (Kurve B), durch den sich im betrachteten Beispiel am piezoelektrischen Element eine im Mittel gleichmäßig auf einen vorgegebenen Endwert ansteigende Spannung (Kurve A) einstellt; aus dem wie gezeigt erfolgenden wiederholten Schließen und Öffnen des Entladeschalters (Kurve D) resultiert ein zwar schwankender, aber im Mittel gleichbleibend großer Entladestrom (Kurve B), durch den sich im betrachteten Beispiel am piezoelektrischen Element eine im Mittel gleichmäßig auf einen vorgegebenen Endwert abfallende Spannung (Kurve A) einstellt.

Der mittlere Lade- bzw. Entladestrom, aber auch die Spannung, auf die das piezoelektrische Element zu laden bzw. zu entladen ist, sind im betrachteten Beispiel variabel und können nicht nur in Abhängigkeit von der Kapazität des piezoelektrischen Elements, sondern zusätzlich insbesondere in Abhängigkeit von der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge, der Motordrehzahl, dem Druck im Rail oder der Motortemperatur festgelegt werden.

Bei einer weiteren Ausführungsform erfolgt das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 mit einer mehrstufigen Ansteuerung. D.h., der Ladeschalter 3 bzw. der Entladeschalter 5 werden während des Lade- bzw. Entladevorganges mehrmals geschlossen und geöffnet. Bei der dargestellten Ausführungsform erfolgt eine zweistufige Ansteuerung, das heißt der Ladeschalter 3 bzw. der Entladeschalter 5 werden jeweils zweimal angesteuert.

In der Fig. 8 repräsentiert

- die mit A bezeichnete Kurve den Verlauf der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung,
- die mit B bezeichnete Kurve den Ladestrom bzw. den Entladestrom, durch den das piezoelektrische Element geladen bzw. entladen wird,
- die mit C bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Ladeschalters, und
- die mit D bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Entladeschalters.

5

Aus dem zweimaligen Schließen und Öffnen des Ladeschalters (Kurve C) resultiert ein zweimal ansteigender und dann abfallender Ladestrom (Kurve B), durch den sich im betrachteten Beispiel am piezoelektrischen Element eine in zwei Stufen auf einen vorgegebenen Endwert ansteigende Spannung (Kurve A) einstellt; aus dem zweimaligen Schließen und Öffnen des Entladeschalters (Kurve D) resultiert ein zweimal abfallender und ansteigender Entladestrom (Kurve B), durch den sich im betrachteten Beispiel am piezoelektrischen Element eine in zwei Stufen auf einen vorgegebenen Endwert abfallende Spannung (Kurve A) einstellt.

10

Der Lade- bzw. Entladestrome, die Zeitdauern der einzelnen Ansteuerungen aber auch die Spannung, auf die das piezoelektrische Element zu laden bzw. zu entladen ist, sind im betrachteten Beispiel variabel und können nicht nur in Abhängigkeit von der Kapazität des piezoelektrischen Elements, sondern zusätzlich insbesondere in Abhängigkeit von der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge, der Motordrehzahl, dem Druck im Rail oder der Motortemperatur festgelegt werden.

15

Die Bauteile sind derart dimensioniert, daß das gewünschte Spannungsniveau jeweils mit einem Schaltvorgang erreicht wird. Dadurch können die Anzahl der Schaltvorgänge reduziert werden. Dadurch ergeben sich neben einem stetigen Spannungsverlauf geringe elektromagnetische Störungen und geringe Schaltverluste.

20

Ferner vereinfacht sich die Ansteuerung der Leistungsschalter erheblich. Eine komplexe Berechnung der Schaltzeiten kann entfallen.

Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung ermöglichen es unabhängig von den Einzelheiten deren praktischer Realisierung, daß das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen unter allen Umständen wunschgemäß schnell und weit durchgeführt werden kann.

25

Patentansprüche

1. Verfahren zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1), **dadurch gekennzeichnet**, daß der das piezoelektrische Element ladende Ladestrom bzw. der das piezoelektrische Element entladende Entladestrom unter Berücksichtigung der Kapazität des piezoelektrischen Elements eingestellt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Ladestrom bzw. der Entladestrom unter Berücksichtigung der momentanen Kapazität des piezoelektrischen Elements (1) verändert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Ladestrom bzw. der Entladestrom unter Berücksichtigung von Abweichungen der Kapazität des piezoelektrischen Elements (1) von einem Sollwert verändert wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Abweichung der Kapazität des piezoelektrischen Elements (1) vom Sollwert basierend auf der Längenänderung des piezoelektrischen Elements erfolgt, welche dieses beim Laden bzw. Entladen erfährt.
5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Abweichung der Kapazität des piezoelektrischen Elements (1) vom Sollwert basierend auf der Zeit erfolgt, während welcher das piezoelektrische Element geladen oder entladen werden muß, um auf eine bestimmte Spannung gebracht zu werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der bei einem nächsten Lade- oder Entladevorgang zu verwendende Lade- oder Entladestrom durch Multiplikation des beim vorhergehenden Lade- oder Entladevorgang verwendeten Lade- oder Entladestroms mit einem Korrekturfaktor errechnet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Korrekturfaktor basierend auf dem Verhältnis von Ist-Werten von beim oder nach einem Lade- oder Entladevorgang gemessenen Größen und den Soll-Werten dieser Größen berechnet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Korrekturfaktor oder der Lade- oder Entladestrom unter Verwendung von Schwellenwerten oder Dämpfungsfaktoren in ihrer Größe oder Größenveränderungen begrenzt werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Ladestrom bzw. der Entladestrom während eines Lade- bzw. Entladevorganges im wesentlichen konstant gehalten wird.
10. Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1), gekennzeichnet durch eine Steuer- oder Regeleinrichtung, welche dazu ausgelegt ist, den das piezoelektrische Element ladenden Ladestrom bzw. den das piezoelektrische Element entladenden Entladestrom unter Berücksichtigung der Kapazität des piezoelektrischen Elements einzustellen.

30

35

40

45

50

55

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

60

65

- Leerseite -

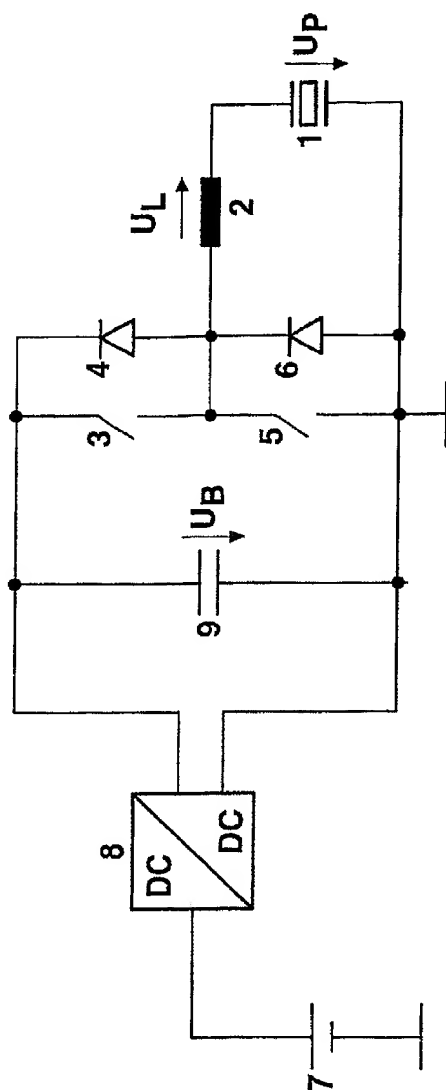


Fig. 1a

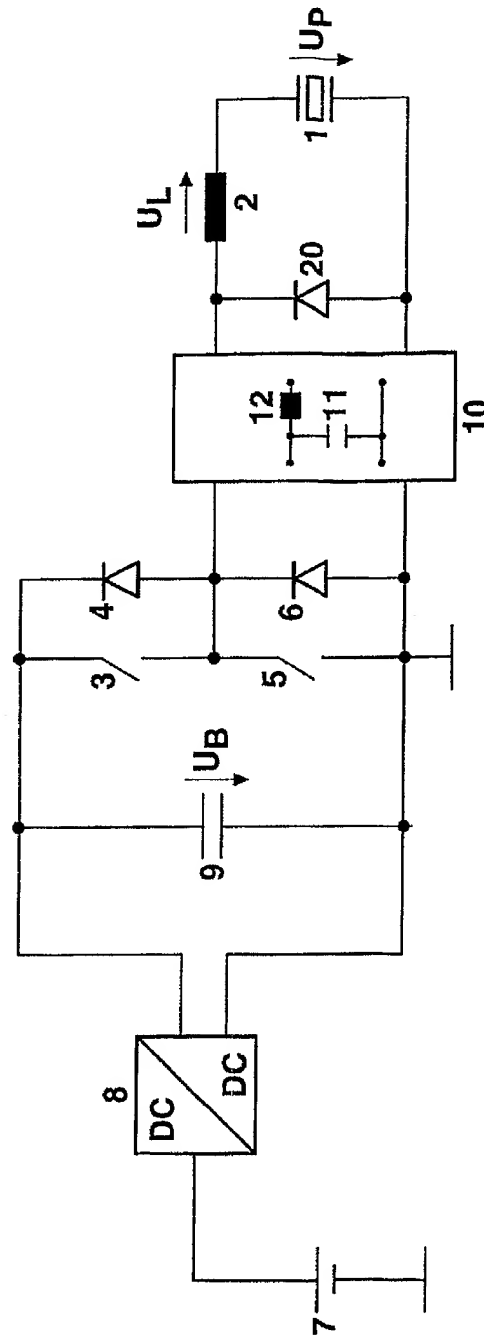


Fig. 1b

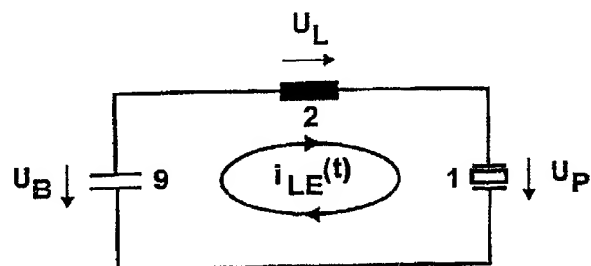


FIG. 2

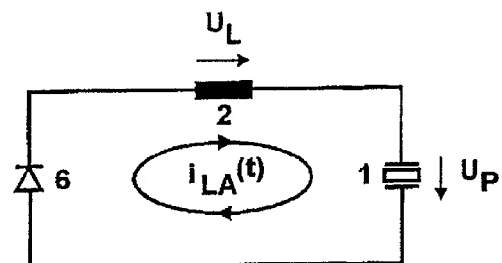


FIG. 3

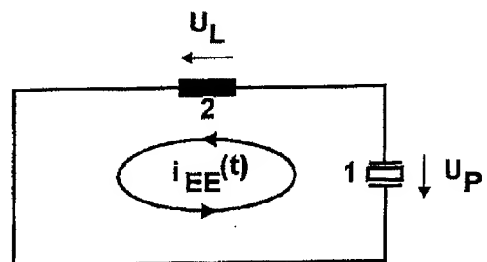


FIG. 4

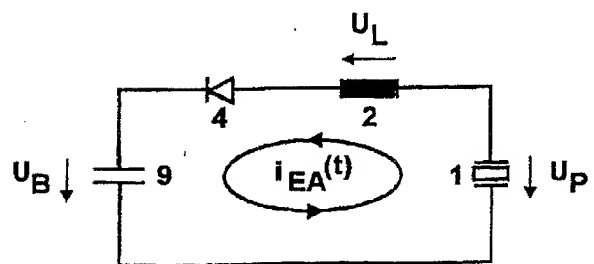


FIG. 5

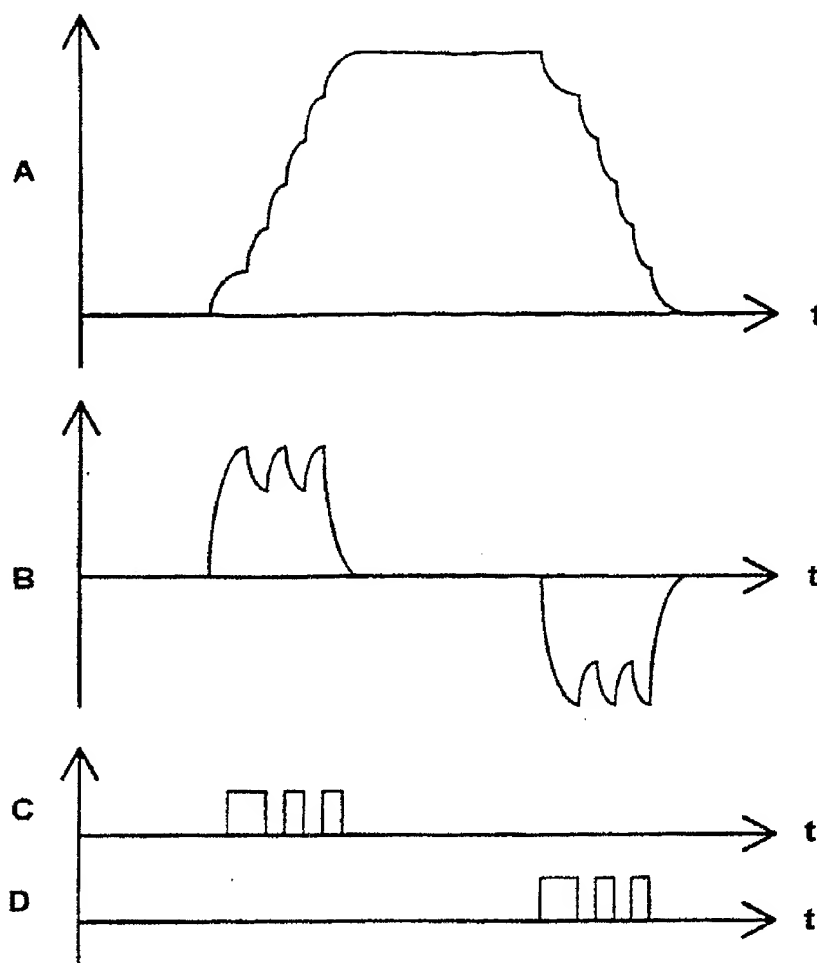


FIG. 6

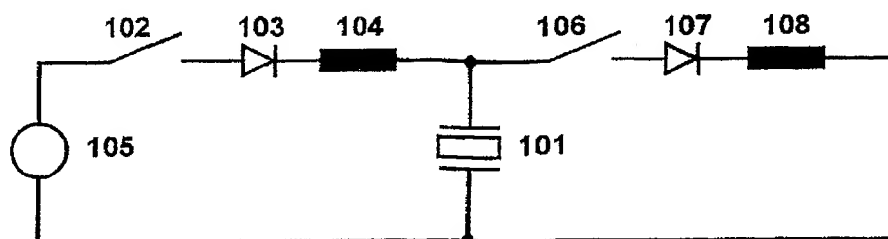


FIG. 7

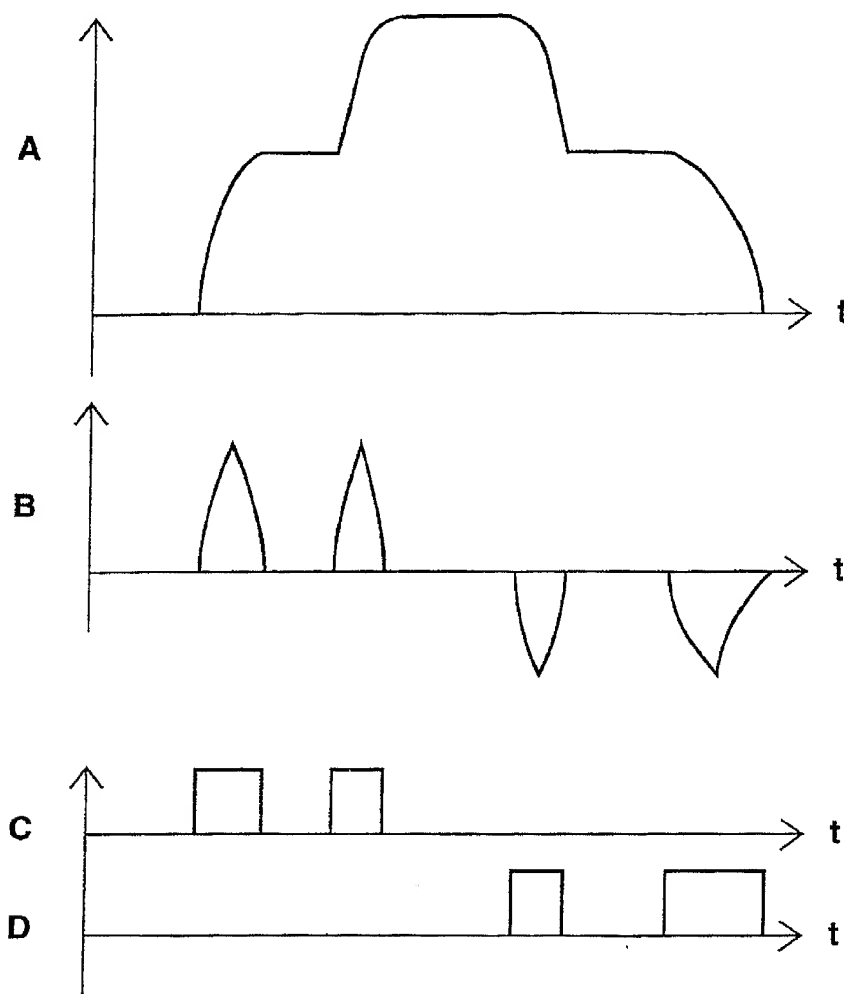


Fig. 8